第39卷 第2期
2022年3月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 39 No. 2
Mar. 2022

长期滴灌棉田非灌溉季节土壤盐分累积特征

谭明东[1,2]， 王振华[1,2]， 王 越[1,2]， 李文昊[1,2]， 宗 睿[1,2]， 邹 杰[1,2]

（1. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832000；
2. 现代节水灌溉兵团重点实验室，新疆 石河子 832000）

摘 要：非灌溉季节冻融过程中土壤水盐的运动变化特征，直接影响春季作物灌水决策。本文对新疆绿洲灌区6块不同滴灌年限的棉田地块进行田间采样监测，探究冻融过程中土壤水盐运移规律以及不同滴灌年限棉田土壤盐分累积特征。结果表明：(1) 随滴灌年限的增加，棉田盐分分布特征由表层聚集转变为向深层累积。(2) 在冻融过程中，棉田土壤盐分运动特征存在明显的地块差异，荒地（CK）和滴灌17 a、19 a、23 a地块出现返盐趋势，平均盐分通量为43.61 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$、172.57 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$、38.18 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$和10.53 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$。(3) 消融期是荒地（CK）、13 a、15 a、17 a、19 a和23 a地块水分和盐分运移最活跃的时期，冻融后所有地块敏感区（0~60 cm）土壤贮水量分别增加了23.43 mm、81.26 mm、31.68 mm、62.39 mm、96.98和69.64 mm。研究揭示了冻融过程中土壤水盐运移规律以及不同滴灌年限棉田盐分累积特征，可对新疆非灌溉季冻融条件下和长期滴灌下的土壤管理提供科学指导。

关键词：滴灌棉田；冻融；盐分通量；盐分累积；水分损失

相比于传统灌溉模式，膜下滴灌技术凭借其出色的节水、保墒等性能[1-2]，被干旱半干旱地区大面积采用。新疆作为我国最典型的膜下滴灌技术示范地，距今，其膜下滴灌面积已经超过1.28×10^6 hm^2[3]。但在新疆规模化膜下滴灌技术的推广应用过程中，大部分排碱沟渠被填平，土壤中的盐分失去了减少的途径，只是在土壤内部重新分布，盐分依然累积在土体中[4]。耕层形成盐分淡化层[5]，造成“脱盐假象”，虽短时期内能够保证作物正常生长发育，开春后土壤表层盐分依然较高，长期膜下滴灌棉田土壤脱盐和积盐的矛盾始终存在。

非灌溉季节土壤盐分运动贯穿冻融发展的整个过程。由于冻土中地温随时间和空间变化，导致土体周期性的冻结和融化。在土体自上往下冻结过程中，土壤水分相变为冰，冻层上下发生明显的土水势梯度，会导致盐分随水分自下往上运移[6]，使得冻结期土壤表层也有积盐的可能。李伟强等[7]研究表示，由于消融期大量降雪及“冻层滞水”的融化，表层土壤盐分可得到有效淋洗，土壤表层脱盐。但方汝林等[8]的研究认为，在开春消融期由于强烈的蒸发作用以及雪水融化，土壤地下水位被抬高，盐分表聚趋势强烈。还有学者指出冻融作用是土壤盐碱化的主要驱动因素[9-10]。因此，非灌溉季节棉田土壤水盐的时空分布变化特征对棉花的生长有着不可忽视的影响。新疆作为我国最大的优质棉产区和季节性冻土地区，棉花种植面积达到8.69×10^5 hm^2[3]，冻土面积更是达到7.40×10^6 hm^2[11]。土壤盐分含量直接影响棉花生长情况，但应用膜下滴灌技术将会显著降低浅层土壤含盐量，从而达到提高棉花出苗率和产量的可能[5]。所以探究季节性冻融对不同滴灌年限棉田土壤盐分时空变化的影响对科学指导春季灌水决策和膜下滴灌技术的可持续发展具有重要意义。

在分布着大量季节性冻土的国家和地区，冻融过程中土壤水盐的运动情况和分布变化规律一直是学者研究的热点问题[12-17]，弄清冻融过程中土壤水分和盐分的运动，对于合理开发利用土地资源，提高作物产量以及预防盐碱灾害等方面都具有重要意义。因此，本文通过对6块不同滴灌年限的棉田进行自然取土观测，旨在揭示盐分在冻融过程中

收稿日期：2021-07-19； **修订日期：**2021-09-29
基金项目：国家自然科学基金项目（51869027）；兵团重点领域创新团队项目（2019CB004）
作者简介：谭明东（1998-），男，硕士研究生，主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究. E-mail: tanmingdong1998@163.com
通讯作者：王振华. E-mail: wzh2002027@163.com

的迁移规律，以及不同滴灌年限下盐分累积特征情况，为膜下滴灌技术在绿洲棉田的可持续应用提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

试验区位于新疆生产建设兵团第八师121团(85°32′47″~85°34′15″E，44°45′85″~44°48′48″N，平均海拔300~500 m)。该地属于典型的温带大陆性气候，为典型的季节性冻土地区。2020年试验区全年总降雨量为84.3 mm，日均气温为8.37 °C，最高气温38.7 °C，最低气温-27.1 °C，试验期间(2020-11-15—2021-03-31)总降水量为38.5 mm、平均气温为-8.56 °C(图1)。本研究选取的6个地块分别是自1998年、2002年、2004年、2006年、2008年开始应用膜下滴灌技术的棉田，以及荒地作为对照地块(CK)，对应的连续膜下滴灌应用年限分别为23 a、19 a、17 a、15 a、13 a、0 a。

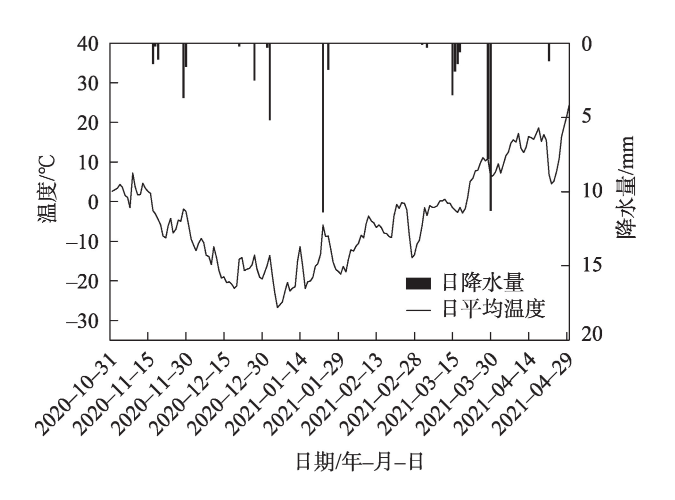


图1 试验期间日降水量和日平均气温

Fig. 1 Daily precipitation and daily average temperature during the experimental period

1.2 数据测定和处理

1.2.1 土壤水分和盐分 在冻融的3个阶段即冻结前期(2020-11-15—2020-12-15)、冻结期(2020-12-15—2021-03-11)和消融期(2021-03-11—2021-03-31)取样，土壤样品通过土钻法获得。为消除滴灌带来的盐分水平方向上的差异，每块棉田选择3个取样区，每个取样区选择3个水平间距30 cm取样点，取样深度200 cm，分别在0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~60 cm、60~70 cm、70~80 cm、80~90 cm、90~100 cm、100~120 cm、120~140 cm、140~160 cm、160~180 cm和180~200 cm共15个土层进行采样，相同深度土层土壤样品混合，取3个取样区的平均值作为各地块的表征数据。

采用烘干法得到土壤的质量含水率。将烘干后的土样磨碎，过2 mm筛，按土水比1:5配制土壤浸提液，经震荡、沉淀、过滤后，取上清液，利用DDS-11A电导率仪测出其电导率(Electrical Conductivity，EC，$dS\cdot m^{-1}$)。通过残渣法标定土壤全盐含量，标定结果见图2。

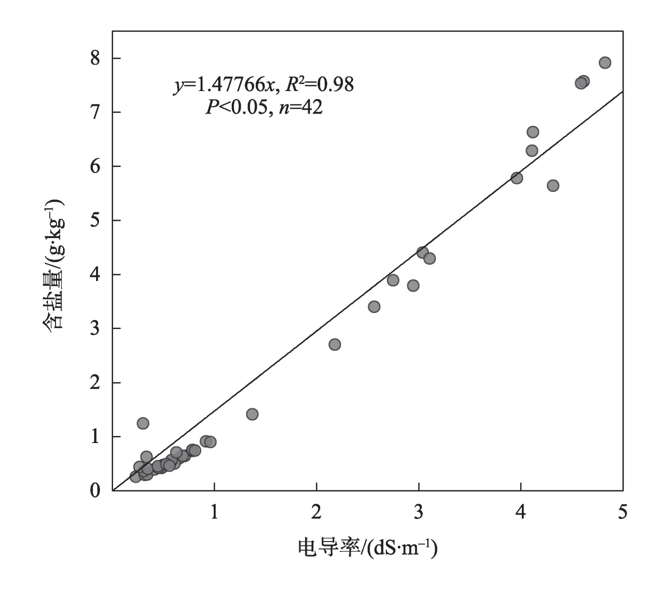


图2 土壤电导率和含盐量标定曲线

Fig. 2 Calibration curve of soil EC and salt content

1.2.2 土壤储盐量和盐分通量 将换算得到的各土层土壤含盐量通过公式(1)[18]计算其单位面积(1 m^2)的储盐量(简称储盐量)：

$$S = 10\gamma hC \tag{1}$$

式中：S为h cm深度土层内储盐量(g)；γ为该土层土壤容重($g\cdot cm^{-3}$)，荒地平均土壤容重取1.66 $g\cdot cm^{-3}$，滴灌棉田平均土壤容重取1.51 $g\cdot cm^{-3}$；h为土层深度(cm)；C为土壤含盐量($g\cdot kg^{-1}$)。

假设盐分在土壤中只进行一维垂直运动，则盐分通量可通过公式(2)[19]计算：

$$Q_{i+1} - Q_i = \Delta S_i / t \tag{2}$$

式中：Q_{i+1}和Q_i分别是目标土层上下界面的盐分通量($g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$)，并规定表层(0 cm)土壤盐分通量为0；$\Delta S_i$为第$i$层土壤储盐量变化量(g)；$t$为时段持续时间(d)。根据定义可知，若$Q$>0，则表示该土层在计

算时段内盐分累积;若$Q<0$,则表示该土层在计算时段内盐分降低。

1.2.3 土壤贮水量和水分损失 各土层贮水量通过公式(3)[20]计算:

$$W = 10\gamma h\theta \tag{3}$$

式中:W为h cm深度土层内贮水量(mm);γ为该土层土壤干容重(g·cm^{-3});h为土层深度(cm);θ为土壤质量含水量(%)。

水分损失通过公式(4)[21]计算:

$$\Delta W = W_j - W_i \tag{4}$$

式中:ΔW为土壤贮水量损失量(mm);W_j为当前土壤贮水量(mm);W_i为上一阶段土壤贮水量(mm)。当$\Delta W<0$时,则为水分损失;当$\Delta W>0$时,则为水分增加。

1.3 数据分析

本次试验采用Excel 2010软件对数据进行整理和预处理,使用SPSS 20.0软件进行单因素方差分析,用Origin 2020软件进行图形的绘制。

2 结果与分析

2.1 长期膜下滴灌棉田土壤盐分变化特征

2.1.1 不同滴灌年限棉田土壤盐分时空分布特征 从冻结前期荒地(CK)、13 a、15 a、17 a、19 a和23 a地块盐分垂直分布特征可以发现(图3),荒地储盐量分布特征整体表现出随剖面往下逐层递减的趋势,表层土壤储盐量最大(1809.84 g),盐分分布特征属典型的表聚型剖面(图3a)。滴灌棉田土壤储盐量表现出随深度增加而增加的趋势,盐分分布特征属底聚型剖面(图3b)。

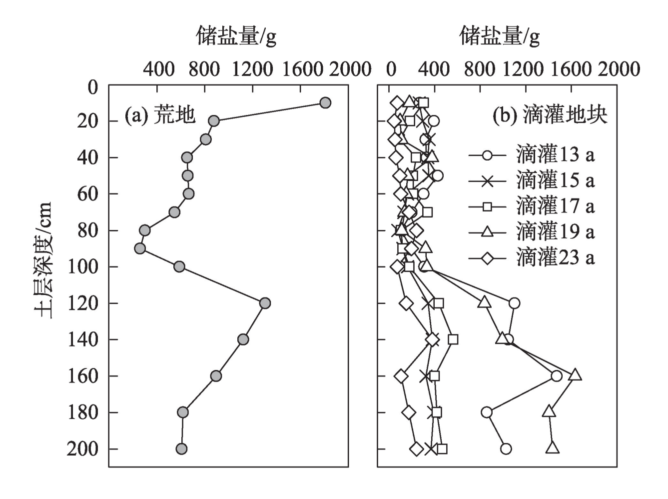


图3 荒地和不同滴灌年限棉田土壤盐分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of soil salt in wasteland and cotton field with different drip irrigation years

2.1.2 不同滴灌年限棉田土壤盐分演变特征 由冻结前期不同滴灌年限棉田各土层以及总储盐量随滴灌年限变化可以发现(图4),0~60 cm和60~120 cm土层土壤总储盐量随滴灌年限均显著降低($P<0.05$),决定系数R^2分别为0.98、0.74。120~200 cm土层和全剖面土壤储盐量也呈现降低的趋势,决定系数R^2分别为0.13、0.66,但随滴灌年限变化并不显著。

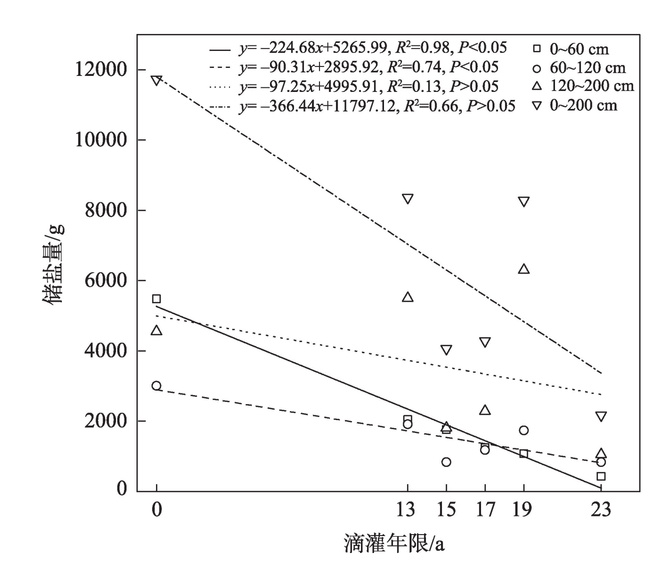


图4 不同土层储盐量随滴灌年限变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of soil salt storage in different soil layer with drip irrigation years

2.2 冻融过程中土壤盐分累积特征和水分损失情况

2.2.1 冻融过程中土壤盐分累积特征 从冻结前期不同滴灌年限棉田各土层的盐分通量图可以看出(图5a),荒地盐分运动幅度明显大于滴灌地块,平均盐分通量为−155.59 g·m^{-2}·d^{-1},盐分通量随深度的增加呈递减的趋势,说明此时期内荒地盐分整体被淋溶,土壤含盐量降低。滴灌地块0~120 cm土层盐分运动明显不如120~140 cm剧烈。此时期内,除滴灌19 a和23 a地块30~70 cm土层和滴灌15 a地块140~200 cm土层土壤盐分表现为累积外,其余地块土壤盐分均表现为降低。另外可以发现,荒地(CK)、13 a、15 a、17 a、19 a和23 a地块0~20 cm土层盐分均向下迁移流失,平均盐分通量为−59.20 g·m^{-2}·d^{-1}、−5.83 g·m^{-2}·d^{-1}、−5.08 g·m^{-2}·d^{-1}、−0.46 g·m^{-2}·d^{-1}、−0.88 g·m^{-2}·d^{-1}和−0.55 g·m^{-2}·d^{-1}。

从图5b可以看出,冻结期土壤盐分变化幅度较

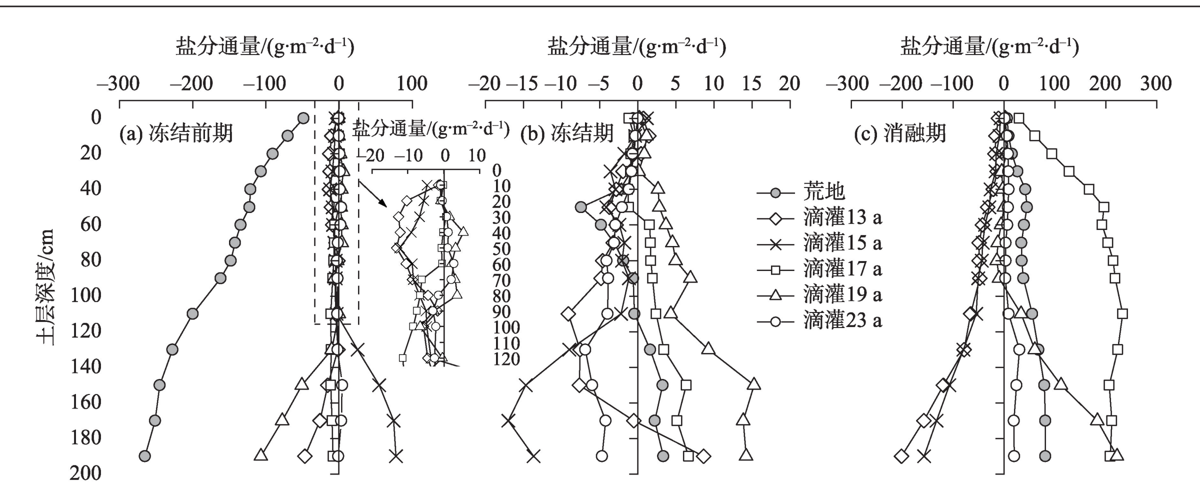


图5　冻融过程中各地块盐分通量分布特征

Fig. 5　Distribution characteristics of salt flux in each plot during freezing and thawing

小,各地块盐分通量变幅明显小于冻结前期。此时期内,荒地0~120 cm土层,滴灌13 a地块40~180 cm土层,滴灌15 a和23 a地块20~200 cm土层和滴灌17 a地块0~60 cm土层盐分继续降低,平均盐分通量分别为−2.08 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$、−4.44 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$、−5.48 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$、−3.19 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$和−1.00 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$。而剩余土层盐分表现出累积的现象,其中滴灌19 a地块土壤盐分则表现出全面增加的现象,盐分通量随土层的增加呈增加的趋势,平均盐分通量为5.67 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$。

从图5c可以看出,消融期是各地块土壤盐分活动最活跃的时期。此时期内,以滴灌年限15 a为界限,盐分的变化可大致分为两种。一种是整体降低,盐分通量随深度的加深而降低,以滴灌13 a和15 a地块为例,其平均盐分通量分别为−61.46 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$和−53.87 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$。另一种盐分运动表现形式则是整体增加,随土层深度的增大盐分通量的增幅也表现为增大,以荒地和滴灌17 a、19 a和23 a地块为例,平均盐分通量分别为43.61 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$、172.57 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$、38.18 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$和10.53 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$。

2.2.2　冻融过程中土壤水分损失特征　通过各地块在冻融期间贮水量的分布特征可以看出(图6),可以将土壤贮水量的分布大致分为3个区段。第1个区段为0~60 cm敏感区(Ⅰ区),第2个区段为60~120 cm稳定区(Ⅱ区),第3个区段为120~200 cm深层活跃区(Ⅲ区)。敏感区土壤贮水量受太阳辐射、日照强度、气温等环境因素影响较大[21],水分易于损失和恢复。同时此区段为棉花根系生长主要场所,其土壤贮水量动态变化情况直接影响根系生长

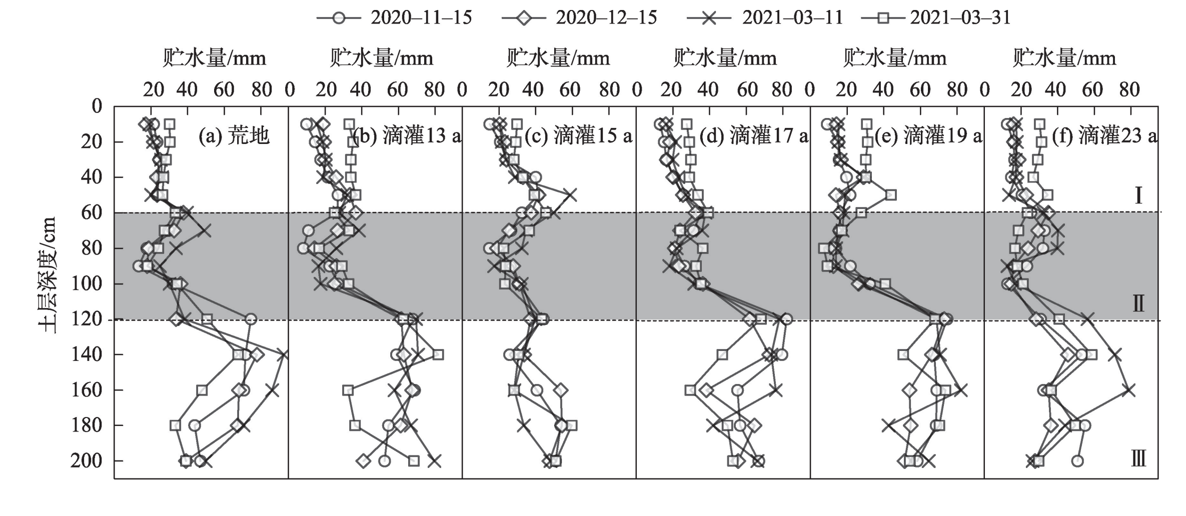


图6　各地块贮水量分布特征

Fig. 6　Distribution characteristic of water storage in each plot

状况,是本次试验重点分析区段。稳定区贮水量波动幅度较小,土壤贮水量分布特征相对稳定,受外界因素影响较小。而深层活跃区土壤贮水量的变化波动主要受到地下水位动态影响,水分有较强的变化波动。

从各地块土壤敏感区总贮水量水分损失情况可知(表1),在冻结前期,荒地敏感区土壤贮水量降低3.89 mm,而其他滴灌地块均增加,平均增加14.82 mm。在冻结期,滴灌13 a和23 a地块土壤贮水量分别降低20.98 mm和10.96 mm,其余地块均增加。而消融期所有地块土壤贮水量均增加,平均增加45.89 mm。冻融后,荒地(CK)、13 a、15 a、17 a、19 a和23 a滴灌棉田敏感区土壤贮水量均增加,分别增加23.43 mm、81.26 mm、31.68 mm、62.39 mm、96.98 mm和69.64 mm,平均增加60.90 mm。对比荒地和滴灌地块的水分损失情况可知,荒地不论是在水分活动强烈的消融期,还是水分运动相对较弱的冻结期和冻结前期,其水分损失幅度均小于滴灌地块平均值。

3 讨论

本研究中,盐分分布特征随滴灌年限的增加由表聚型分布逐渐转变为均匀型分布,观察滴灌23 a地块可发现其土壤盐分分布整体波动较小,深层土壤储盐量明显小于其他地块,盐分在竖直方向上的分布已趋于均匀(图3b)。这与李宝富等[22]对不同耕作时间下土壤盐分动态监测的研究结果基本一致。不过,其研究中追踪的耕作年限最多只到10 a,而对10 a后土壤盐分的分布变化情况无法确定。本研究发现,棉田盐分分布特征随滴灌年限转变的进程中,滴灌17 a和19 a的地块深层土壤含盐量相较滴灌15 a地块不减反增。而滴灌19 a地块在160~180 cm土层含盐量甚至超过了荒地和滴灌13 a地块,已经出现了土壤次生化盐渍化的趋势。由于缺乏对滴灌年限为0~13 a内相应地块的监测,对滴灌应用早期棉田土壤盐分变化规律及影响机制只能借助理论和前人研究来理解。研究结果表明,长期膜下滴灌能够显著淋洗0~120 cm土层内土壤盐分,但对120~200 cm土层土壤盐分的淋洗作用并不显著,这与多数学者[23-25]的研究结果相似。同时,这也体现了滴灌压盐的局限性,盐分始终续存在土体中,加上地表强烈的蒸发作用和地下水动态的影响,土壤盐渍化发生的机率增大。张伟等[26]人的研究显示,棉田0~60 cm土层内土壤盐分随滴灌年限累积,这与本研究结论明显不同,但这是由于其研究中采用的是微咸水(平均含盐量2.52 g·L^{-1})灌溉,外界盐分输入是导致其在土壤中累积的主要原因。还需注意的是,本研究收集的是棉花收获后的盐分数据,表征的是灌水停止后盐分在土壤相对稳定的状态,因此可以更客观的比较不同滴灌年限地块之间盐分的变化特征。而前人研究多在生育期进行,此时,土体中盐分动态更多会受到当时灌溉制度的影响。

盐分通量[18,27]作为表征盐分在不同土层上下运移的有力参数,对于刻画盐分累积特征有显著效果。李文昊等[27]研究发现,冻融前后棉田0~140 cm土层土壤储盐量均降低,指出自然冻融循环作用可淋洗棉田土壤盐分,但其研究缺乏对冻融过程中盐分运动情况的分析。本文中,冻结前期各地块0~20 cm土层盐分均向下迁移,且盐分通量随滴灌年限的增加呈降低的趋势(图5)。这主要是由于该土层内土壤含盐量随滴灌年限显著降低的原因,从而导致盐分运动幅度随滴灌年限减弱。而冻结期盐分的运动出现了地块差异,滴灌19 a的地块各土层盐分均向上运动,而其余地块则在不同土层出现盐分通量正负交替的现象(图6)。这与彭振阳等人[18]的研究结果相似。在消融期,除滴灌13 a和15 a地块外,其余地块盐分整体向上运动,出现返盐的征兆,这

表1 各地块敏感区段水分损失情况

Tab. 1 Soil water loss in sensitive layer of each plot

时段	各地块敏感区水分损失量/mm					
	0 a	13 a	15 a	17 a	19 a	23 a
冻结前期(2020-11-15—2020-12-15)	-3.89	37.32	6.22	2.97	7.30	20.31
冻结期(2020-12-15—2021-03-11)	3.91	-20.98	23.63	15.74	8.45	-10.96
消融期(2021-03-11—2021-03-31)	23.41	64.91	1.83	43.69	81.23	60.28
全时期(2020-11-15—2021-03-31)	23.43	81.26	31.68	62.39	96.98	69.64

与康双阳等[28]、张殿发等[29]的研究结果相似。而滴灌13 a和15 a地块盐分继续下移，这与李伟强等[7]冻层滞水淋洗盐分的结论有一定呼应。本研究发现，冻结前期荒地土壤盐分变化幅度比棉田土壤更剧烈。除了土体本身含盐量的改变外，还可能是由于长期膜下滴灌影响了棉田土壤结构，土壤颗粒之间排列发生变化，土壤孔隙分布受到影响，使得土壤中盐分的运动通道变化，导致的盐分在冻融过程中运动幅度降低。

本研究结果表明，消融期是冻融前后各地块敏感区土壤水分增加贡献最大的时期（表1）。这是由于气温回升导致积雪融化，引起土壤含水率增大的结果。但本次试验监测距棉花播种截止时间仍有一定时间间隔，期间气温还将继续升高，且降水稀少（图1），土壤水分大概率将处于一种损失的状态。而本试验区棉花均是按照“干播湿出”的播种模式，因此这段时间内土壤水分的损失情况将决定棉花出苗定额的多少。前人研究[30-32]指出，在全年或者冻融期对地表进行覆盖措施能有效保存土壤水分。单小琴等[33]研究指出，在冻融期覆膜蓄水保墒方面更具现实意义。因此，在为了保持土壤水分以及节约水资源的条件下，建议在冻融期对棉田进行秸秆覆盖[34]，这对预防土壤冻害和蓄水保墒等方面都能起到积极的作用[35]。

4 结 论

通过对121团6块不同滴灌年限棉田的土壤水分和盐分在冻融过程中变化特征的分析，得出以下结论：

（1）随滴灌年限的增加，棉田0~120 cm土壤含盐量显著降低（$P<0.05$），盐分分布特征从表聚型向底聚型转变。

（2）冻结前期荒地（CK）、13 a、15 a、17 a、19 a和23 a地块的0~20 cm土层盐分下移，平均盐分通量分别为−59.20 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$、−5.83 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$、−5.08 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$、−0.46 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$、−0.88 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$和−0.55 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$。冻结期和消融期盐分运动出现地块差异，冻结期滴灌19 a地块土壤盐分表现出全面增加的现象，平均盐分通量为5.67 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$，其余地块在不同层位出现盐分通量正负交替的现象。消融期土壤盐分运动强烈，滴灌13 a和15 a地块盐分含量整体降低，平均盐分通量为−61.46 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$和−53.87 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$，其余地块表现为整体增加，出现返盐趋势，平均盐分通量分别为43.61 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$、172.57 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$、38.18 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$和10.53 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$。

（3）0~60 cm是棉田土壤贮水量敏感区，冻融后荒地（CK）、13 a、15 a、17 a、19 a和23 a地块的敏感区土壤贮水量分别增加23.43 mm、81.26 mm、31.68 mm、62.39 mm、96.98 mm和69.64 mm，消融期是土壤贮水量增加的主要贡献时期。

新疆干旱区绿洲棉田是重要经济作物的基础，为抑制冻融后土壤返盐对春季播种后棉花的生长，在坚持现行灌溉制度的基础下，可在非灌溉季节进行棉秆还田等覆盖措施，在减少土壤水分蒸发的同时抑制返盐。并可适当追加淋洗定额，但仍需注意节约水资源。

参考文献（References）：

[1] Westarp S V, Chieng S, Schreier H. A comparison between low-cost drip irrigation, conventional drip irrigation, and hand watering in Nepal[J]. Agricultural Water Management, 2004, 64(2): 143−160.

[2] 宁松瑞, 左强, 石建初, 等. 新疆典型膜下滴灌棉花种植模式的用水效率与效益[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 90−99. [Ning Songrui, Zuo Qiang, Shi Jianchu, et al. Water use efficiency and benefit for typical planting modes of drip-irrigated cotton under film in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(22): 90−99.]

[3] 新疆生产建设兵团统计局. 新疆生产建设兵团统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020. [Statistics Bureau of Xinjiang Production and Construction Crops. Xinjiang Production & Construction Corps Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.]

[4] 李毅, 王文焰, 王全九. 论膜下滴灌技术在干旱−半干旱地区节水抑盐灌溉中的应用[J]. 灌溉排水, 2001, 20(2): 42−46. [Li Yi, Wang Wenyan, Wang Quanjiu. A breakthrough thought for water saving and salinity control in arid and semi-arid area under-film trickle irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2001, 20(2): 42−46.]

[5] 王振华, 杨培岭, 郑旭荣,等. 膜下滴灌系统不同应用年限棉田根区盐分变化及适耕性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 90−99. [Wang Zhenhua, Yang Peiling, Zheng Xurong, et al. Soil salinity changes of root zone and arable in cotton field with drip irrigation under mulch for different years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(4): 90−99.]

[6] 张殿发, 郑琦宏, 董志颖. 冻融条件下土壤中水盐运移机理探讨[J]. 水土保持通报, 2005, 25(6): 14−18. [Zhang Dianfa, Zheng Qihong, Dong Zhiying. Mechanism of soil salt-moisture transfer under freeze-thawing condition[J]. Bulletin of Soil and Water Conser-

vation, 2005, 25(6): 14–18.]

[7] 李伟强, 雷玉平, 张秀梅,等. 硬壳覆盖条件下土壤冻融期水盐运动规律研究[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 251–257. [Li Weiqiang, Lei Yuping, Zhang Xiumei, et al. Study of water and salt migration in soil under concrete mulch during freezing/thawing period [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 251–257.]

[8] 方汝林. 土壤冻结-消融期水盐动态的初步研究[J]. 土壤学报, 1982, 19(2):164–172. [Fang Rulin. Preliminary study on the dynamical regime of water and salt during the freezing and thawing period of soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 1982, 19(2): 164–172.]

[9] 王维真, 吴月茹, 晋锐, 等. 冻融期土壤水盐变化特征分析——以黑河上游祁连县阿柔草场为例[J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 268–274. [Wang Weizhen, Wu Yueru, Jin Rui, et al. Analysis of the variation characteristics of soil moisture and soil salinity: Take Arou Pasture in the upper reaches of Heihe River for an example [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(2): 268–274.]

[10] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 冻融期气温与土壤水盐运移特征研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 70–74. [Li Ruiping, Shi Haibin, Takeo Akae, et al. Characteristics of air temperature and water-salt transfer during freezing and thawing period[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23 (4): 70–74.]

[11] 周幼吾. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000. [Zhou Youwu. Frozen Soil in China[M]. Beijing: Science Press, 2000.]

[12] Brouchkov A. Salt and water transfer in frozen soils induced by gradients of temperature and salt content[J]. Permafrost & Periglacial Processes, 2015, 11(2): 153–160.

[13] Cary J W, Mayland H F. Salt and water movement in unsaturated frozen soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, 36 (4): 549–555.

[14] Gray D M, Granger R J. In situ measurements of moisture and salt movement in freezing soils[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1986, 23(5): 696–704.

[15] Liu J, Yang P, Yang Z J. Water and salt migration mechanisms of saturated chloride clay during freeze-thaw in an open system[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 186(8): 103277.

[16] Shafique U, Anwar J, Munawar M A, et al. Chemistry of ice: Migration of ions and gases by directional freezing of water[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2016, 9(1): 47–53.

[17] Ye X, Huang Z G, Fan Y, et al. Dynamics of soil moisture and salt content after infiltration of saline ice meltwater in saline-sodic soil columns[J]. Pedosphere, 2017, 27(6): 1116–1124.

[18] 彭振阳, 黄介生, 伍靖伟, 等. 秋浇条件下季节性冻融土壤盐分运动规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 77– 81. [Peng Zhenyang, Huang Jiesheng, Wu Jingwei, et al. Salt movement of seasonal freezing- thawing soil under autumn irrigation condition [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 77–81.]

[19] Tan X, Wu J, Wu M, et al. Effects of ice cover on soil water, heat, and solute movement: An experimental study[J]. Geoderma, 2021, 403: 115209.

[20] 姚宝林, 李光永, 王峰. 冻融期灌水和覆盖对南疆棉田水热盐的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 114–120. [Yao Baolin, Li Guangyong, Wang Feng. Effects of winter irrigation and soil surface mulching during freezing-thawing period on soil water-heat-salt for cotton fields in south Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 114–120.]

[21] 靳姗姗, 汪星, 汪有科, 等. 不同覆盖措施对减少枣林休眠期土壤水分损失的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 153–160. [Jin Shanshan, Wang Xing, Wang Youke, et al. Effects of typical mulching patterns on soil water loss in jujube land during dormancy period[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(14): 153–160.]

[22] 李宝富, 熊黑钢, 张建兵, 等. 不同耕种时间下土壤剖面盐分动态变化规律及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 429–438. [Li Baofu, Xiong Heigang, Zhang Jianbing, et al. Dynamic of soil salt in soil profiles different in cultivation age and its affecting factors[J]. Acta Pedologic Sinica, 2010, 47(3): 429–438.]

[23] 刘新永, 田长彦. 棉花膜下滴灌盐分动态及平衡研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 84–87. [Liu Xinyong, Tian Changyan. Study on dynamic and balance of salt for cotton under plastic mulch in south Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conversation, 2005, 19(6): 84–87.]

[24] 谭军利, 康跃虎, 焦艳平, 等. 滴灌条件下种植年限对大田土壤盐分及 pH 值的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 43–50. [Tan Junli, Kang Yuehu, Jiao Yanping, et al. Effects of cropping years on soil salinity and pH value in fields under drip irrigation condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering , 2009, 25(9): 43–50.]

[25] 牟洪臣, 虎胆·吐马尔白, 苏里坦, 等. 不同耕种年限下土壤盐分变化规律试验研究[J]. 节水灌溉, 2011, 36(8): 29–31, 35. [Mu Hongchen, Hudan Tumarbay, Su Litan, et al. Experimental research on salty soil profile transfer law under different farming times[J]. Water Saving Irrigation, 2011, 36(8): 29–31, 35.]

[26] 张伟, 吕新, 李鲁华, 等. 新疆棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. 农业工程学报 , 2008, 24(8): 15–19. [Zhang Wei, Lyu Xin, Li Luhua, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under the plastic mulch in Xinjiang Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(8): 15–19.]

[27] 李文昊, 王振华, 郑旭荣, 等. 冻融对北疆盐碱地长期滴灌棉田土壤盐分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 40–46. [Li Wenhao, Wang Zhenhua, Zheng Xurong, et al. Effects of freezing and thawing on soil salinity in cotton fields by long-term drip irrigation of saline-alkaline soil in North Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 40–46.]

[28] 康双阳, 高维跃, 王风娥. 内蒙古河套灌区冻融土水盐运动规律的测试与分析[J]. 人民黄河, 1987, 39(5): 45–49. [Kang Shuangyang, Gao Weiyue, Wang Fenge. Regularity of water and salt movement in soil in Hetao Irrigated Region, Inner Mongolia, during freezing-melting period[J]. Yellow River, 1987, 39(5): 45–49.]

[29] 张殿发, 王世杰. 土地盐碱化过程中的冻融作用机制——以吉林省西部平原为例[J]. 水土保持通报, 2000, 20(6): 14-17. [Zhan Dianfa, Wang Shijie. Mechanism of freeze-thaw action in land salinization process: As an sample in west Jilin Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000, 20(6): 14-17.]

[30] 李慧, 靳志锋, 岳胜如. 冻融期不同地表覆盖模式对土壤水分的影响[J]. 节水灌溉, 2018, 43(10): 24-26, 32. [Li Hui, Jin Zhifeng, Yue Shengru. Effects of different soil surface mulching method during freezing-thawing period on soil water[J]. Water Saving Irrigation, 2018, 43(10): 24-26, 32.]

[31] 冯慧君, 赵浩然, 郑秀清, 等. 季节性冻融期覆砂对太谷农田土壤含水率时空变化的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 40-45. [Feng Huijun, Zhao Haoran, Zheng Xiuqing, et al. Effect of sand mulching on spatiotemporal variation of soil water content during the seasonal freezing- thawing period[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(5): 40-45.]

[32] 王红丽, 张绪成, 于显枫, 等. 半干旱区周年全膜覆盖对玉米田土壤冻融特性和水热分布的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1146-1154. [Wang Hongli, Zhang Xucheng, Yu Xianfeng, et al. Effects of annual whole-film mulching on freezing-thawing characteristics, moisture, and temperature distribution of maize soil in semi- arid area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1146-1154.]

[33] 单小琴, 郑秀清. 地表覆盖对季节性冻融期土壤水分特征的影响[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 99-103. [Shan Xiaoqin, Zheng Xiuqing. Impacts of surface covering on soil water characteristics during seasonal freeze-thaw period[J]. Water Resource and Power, 2018, 36(7): 99-103.]

[34] 付强, 吴春东, 李天霄. 北方高寒区秸秆覆盖对土壤水分运移的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(10): 7-10. [Fu Qiang, Wu Chundong, Li Tianxiao. Influence of straw mulch on soil moisture migration in northern clod region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(10): 7-10.]

[35] 陈军锋, 郑秀清, 秦作栋, 等. 冻融期秸秆覆盖量对土壤剖面水热时空变化的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 102-110. [Chen Junfeng, Zheng Xiuqing, Qin Zuodong, et al. Effects of maize straw mulch on spatiotemporal variation of soil profile moisture and temperature during freeze-thaw period[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(20): 102-110.]

Soil salt accumulation characteristics of long-term drip irrigation in cotton fields during non-irrigation seasons

TAN Mingdong[1,2], WANG Zhenhua[1,2], WANG Yue[1,2], LI Wenhao[1,2], ZONG Rui[1,2], ZOU Jie[1,2]

(1. College of Water Architectural and Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: To explore the changing characteristics of soil water and salt movement in cotton fields with different drip irrigation years during the freezing and thawing process, this study conducted field sampling and monitoring on five plots with different drip irrigation years and a wasteland (CK) in the Xinjiang oasis irrigation area. The soil salt content of the 0-120 cm soil layer decreased significantly as the drip irrigation years increased, and the salt distribution characteristics changed from a surface accumulation type to a uniform type. During the freezing and thawing process, the characteristics of soil salt movement in cotton fields had obvious plot differences, wherein the soil salt in each layer of the wasteland and the cotton field with 17, 19, and 23 drip irrigation years increased, with average salt fluxes of 43.61, 172.57, 38.18, and 10.53 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, respectively. 0-60 cm range was the sensitive layer of soil water storage in the drip irrigation cotton field. More specifically, the ablation period was the most active period of water and salt movement in each plot. After freezing and thawing, the soil water storage in this area of the wasteland and the cotton field with 13, 15, 17, 19, and 23 drip irrigation years increased by 23.43 mm, 81.26 mm, 31.68 mm, 62.39 mm, 96.98 mm, and 69.64 mm, respectively. This study reveals trends in soil water and salt transport during the freeze- thaw process and the characteristics of salt accumulation in cotton fields with different drip irrigation years. Results provide scientific guidance for soil management under freeze-thaw conditions in non-irrigation seasons and long-term drip irrigation in Xinjiang.

Keywords: drip irrigation cotton field; freeze-thaw; salt flux; salt accumulation; water loss